

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月17日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22710179

研究課題名（和文）乱流による時空間変動を考慮した数値モデルによる複雑地形上での吹雪災害の危険度評価

研究課題名（英文）Risk evaluation of blowing snow based on a numerical simulation of turbulent airflow over complex terrain

研究代表者

根本 征樹（NEMOTO MASAKI）

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター新庄支所・主任研究員

研究者番号：30425516

研究成果の概要（和文）：吹雪による視程悪化や吹きだまり・雪庇の発生は、冬季間の交通障害や雪崩発生の原因となることから、その予測と制御は重要な課題である。本研究では、乱流現象の非定常計算に優れる Large-Eddy Simulation (LES) に基づき、複雑地形上における吹雪の時間・空間変動特性を解析可能な数値モデルを構築した。一様水平な積雪面上における計算結果は実測に整合し、吹雪の変動特性の数値解析において有用であることを確認した。また実在地形を対象としてモデルを拡張し、広域での視程変動などの推定にも応用可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：Drifting snow is an important issue in both engineering and climatological fields; e.g., snowdrifts and reduced visibility, avalanche danger, redistribution of snow in polar regions. In this study, we applied Large-Eddy Simulation (LES), which is superior in the unsteady calculation of the turbulence phenomenon, to blowing snow over flat/complex topography. Calculated fluctuations over a flat and uniform surface agreed quantitatively with wind tunnel experiments and observations, indicating that the model has the ability to reproduce the time evolution of blowing snow. The model is also potentially useful for predicting regional-scale visibility and snowdrift.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

研究分野：複合新領域

1. 研究開始当初の背景

吹雪による視程悪化や吹きだまり・雪庇の発生は、冬季に多発している多重衝突事故や雪崩発生など雪氷災害の主要因であり、その予測と制御は重要な課題である。高速交通網の整備が進み、人の移動や物流が交通に大きく依存する現代社会において、吹雪によりもたらされる様々な障害は依然として大きな問題となっている。これまでににおいても防雪柵の設置など、様々な対策が試みられており、一定の成果を上げているが、近年、防雪柵の効果的な配置場所が再検討されているなど、より効率的な防雪対策が必要となっている。特にわが国では、数十キロの範囲内で平野から山地、田畑から森林地帯に変わるなど地形の変化が大きく、風の流れや吹雪の強度は地域により大きく異なるため、吹雪危険度の地域分布の評価は容易ではない。

吹雪現象において特に重要な点は、その現象が大気乱流による激しい時空間変動を伴うことであり、交通事故の主因とされる視程の突発的変動や吹きだまりの形成プロセスを定量的に論じるにあたっては、時間平均化された情報のみによる従来の研究から脱却し、乱流による3次元の時空間変動を考慮した現象解明が不可欠となる。吹雪の数値モデルはいくつか存在するが、道路上など地上付近を対象とした、小スケール（数メートル以下）の乱流変動の影響を考慮した3次元モデルは国内外ともに例を見ない。例えば、個々の粒子の運動を計算し、吹雪の素過程を厳密に考慮したラグランジュ型モデル（ランダムフライトモデル）などでは、定常的な吹雪の鉛直構造を良く再現することが知られているが、こうしたモデルは水平方向の変化を考慮しない鉛直次元モデルであり、3次元的な時空間変動を扱うことは出来ない。野外観測に関しては、南極氷床においてSPC (Snow Particle Counter) などが用いられ、高度数十メートルまでの粒径・吹雪流量の鉛直分布が求められた例など、基礎研究分野において様々な試みがなされているが、その大半は空間上のある一点における結果であり、水平方向の空間相関ならびにその地形、地物依存性などに関するデータは無い。そのため、道路上の防雪柵周辺や、平野、山地、田畑と森林域など様々な地形・土地状況での吹雪強度の違いなどが明らかになっていないのが現状である。

2. 研究の目的

上述した背景を踏まえ、本研究は非定常乱流の解析に有効なラージ・エディ・シミュレ

ーション(LES: Large-Eddy Simulation)を用いた3次元・非定常乱流場における吹雪の物理モデルを構築し、地形による吹雪強度の変化に着目した野外観測データ等との比較検討からモデルを高度化し、複雑地形上での吹雪強度の分布や、時間・空間変動特性を解析可能な数値モデルを構築することを目的とする。さらには吹雪発生頻度が高い地域を対象として、視程や吹きだまり障害など吹雪による災害の危険度（ポテンシャル）の試験評価にモデルを応用し、吹雪対策に資するものとする。

3. 研究の方法

LESを用いて、3次元・非定常乱流における吹雪の物理モデルを構築する。モデルでは気流相・吹雪粒子相についてそれぞれ輸送方程式を解くことで風速場や吹雪濃度を求めるほか、吹雪粒子の粒径分布の効果などを考慮するものとする。吹雪濃度は移流拡散方程式を解くことで評価されるが、この際、吹雪粒子の落下速度が重要なパラメータとなる。本研究では落下速度の最適値についても検討する。その他、吹雪のLESモデルに各種キャノピーモデルを組み込み、防雪柵、防雪林の効果を検討した解析が可能となる様、改良する。さらには道路など実在する複雑地形上での計算が出来るよう、モデルを境界適合曲線座標系（BFC）張拡張し、吹雪による視程障害の効果的な対策に活用できるものとする。

数値計算のほか、風速・吹雪量の変動を高い時間分解能で計測可能なSPCなどを利用し、吹雪の時間変動特性に着目したデータを取得し、モデルとの比較・検証に用いる。特に、低温風洞において地形・地物モデル（防雪柵など）を用いた実験を実施し、吹雪や吹きだまりの変動特性に関する基礎データを取得する。その他、野外観測により防雪柵周辺の吹きだまり分布なども実測し、モデルの検証データとする。

4. 研究成果

LESによる吹雪解析に先立ち、時間平均乱流モデル（RANS）を用いた計算により、吹雪濃度分布計算において重要なパラメータである吹雪粒子落下速度の最適値の同定を行った。過去に行なわれた野外観測との結果から、吹雪浮遊層の濃度鉛直分布を適切に表現するには、落下速度は既存値（0.5m/s）より小さい0.2m/sとすべきことを明らかにした（図1）。なお、吹雪粒子の粒径は高度により異なるため、落下速度の最適値も厳密には高

度により異なる。したがって粒径の鉛直分布を考慮し、落下速度を高度の関数としてモデルに与えることで、吹雪質量フラックス、吹きだまり量の分布それぞれを適切に評価できることも示した。以下の計算例では、落下速度は高度の関数として与えている。

一様水平な積雪面を仮定した吹雪のLES計算により、水平・鉛直風速と吹雪空間濃度の時間変化を計算した結果、吹雪空間濃度は風速変動に伴い激しく変動するが、10秒程度の周期を持つ変動が顕著であることがわかった。任意高度の水平面上における吹雪空間濃度の瞬間値も場所により大きく異なり、また濃度の変動パターンについては、1m以上の高度差がある場合、目立った鉛直相関は見られない。一般に大気境界層において、乱流変動の空間相関は高度差の増加とともに急激に減少するが、計算された空間濃度分布についても同様の傾向が見られた。また吹雪質量フラックスの変動の大きさを評価するため、風の突風率（ガストファクター）の類推により、フラックスの10分間平均値に対する10分間最大値の比を計算した（図2）。突風率は通常、1.5から2.0程度とされるが、吹雪質量フラックスの場合は4.0から12.0程度とかなり大きな値を示す。なお数値計算から得られた値は実測データ（南極みずほ基地、Nishimura&Kameda, 2008）を解析して得られた値と概ね一致し、本モデルが吹雪変動特性を良く表現できていることがわかる。

一様水平面上における吹雪・風速の変動データについてFFT（高速フーリエ変換）による周波数解析を行ない、変動特性の詳細を調べた。図3に水平風速、鉛直風速、吹雪質量フラックスの変動の無次元パワースペクトル（それぞれの物理量の分散で規格化されている）を示す。吹雪浮遊層における質量フラックスの変動のエネルギーは、特に高周波領域において風速成分より大きいことが分かった。次に、水平風、鉛直風のそれぞれと吹雪質量フラックスとの間のコヒーレンス（相関性）を調べた（図4）。その結果、時間スケールで25秒（ $=1/(0.04\text{Hz})$ ）以上の水平風速変動と吹雪質量フラックス変動との間に相関がある（図中点線、0.04Hzより小さい周波数帯でコヒーレンスが增大することに対応）ことが分かった。なお鉛直風と吹雪質量フラックスとは、全体的にコヒーレンスの値は小さく、両者の相関がほとんどない。ただし水平風、鉛直風いずれの場合も、変動周波数が0.1Hz程度の領域でコヒーレンスが目立って増加し、10秒程度の時間スケールの吹雪変動に対する水平・鉛直風の変動の影響の寄与が示唆された。また、モデル検証のため、低温風洞装置を用いた吹雪実験において、時間応答特性に優れた測器を用いた測定を実施するとともに、過去に取得された野外観

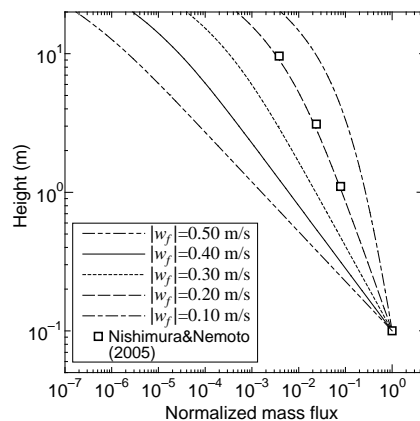


図1. 吹雪質量フラックス ($z=0.1\text{m}$ の値で規格化されている) の鉛直分布。摩擦速度 $u_*=0.40\text{m/s}$ 。□は実測値 (Nishimura&Nemoto, 2005) を示す。

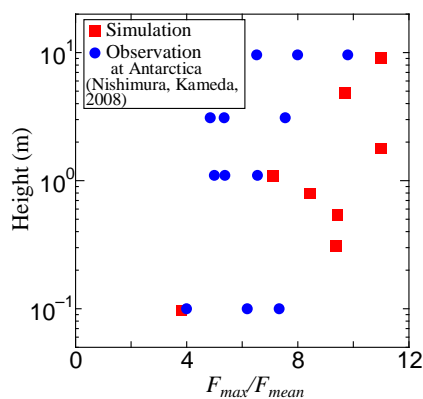


図2. フラックスの10分間平均値 (F_{mean}) に対する10分間最大値 (F_{max}) の比。摩擦速度 $u_*=0.40\text{m/s}$ 。

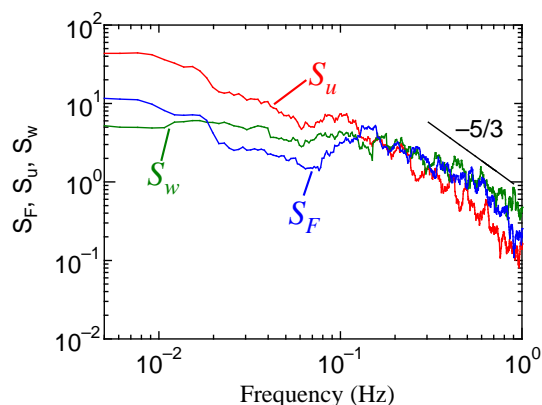


図3. パワースペクトル（それぞれの物理量の分散で規格化されている）。摩擦速度 $u_*=0.40\text{m/s}$ 。

測データの一部を再解析した。これらのデータについてFFT解析し、無次元化した上でモデル結果も含めて相互比較した結果、コヒーレンスの分布形状はピークの発現位置など良く一致した。これは浮遊状態 ($z>0.1\text{m}$) にある吹雪の変動特性について相似則が成り立つことを示唆する。この様な相似則が仮定

できれば、高度毎の吹雪変動特性の推定が容易になるなど、その有用性、波及効果は高い。

一様水平面上での計算に加えて、水平面上に防雪柵や防雪林が設置されている場合の計算も実施した。図5は防雪柵周辺における流れ場の瞬間断面図の例である。RANSによる結果（比較的一様な風速断面となる）と大きく異なり、特に柵の近傍において風の乱れが激しい様子がわかる。防雪柵模型を用いた風洞実験および、既存研究結果や北海道十勝地方において取得された防雪柵周辺の風速・吹きだまりデータを活用し、モデルで用いている防雪柵モデルの検証も実施した。柵周辺の平均風速分布については定性的に一致した結果が得られるものの、吹きだまり形成位置については実験、観測、モデルそれぞれについて違いも見られ、モデリングおよび実験手法に課題が残された。

実在地形を対象として、吹雪の空間分布とその時間変動を得るために、吹雪モデルを地域気象モデルに組み込んだ（ただし計算負荷・時間の問題もあり、今回は吹雪輸送における移流の効果を無視した：実質的には鉛直1次元モデルに相当する）。吹雪モデルにおいては、吹雪濃度分布に加えて、計算グリッド毎における吹雪濃度の収支から吹きだまり分布も計算出来る様、モデルを改良した。また計算では、微地形効果を考慮するために、土地利用情報等に基づき地表面粗度を計算グリッド毎に調整した。山形県周辺を対象領域として水平解像度1.5kmの計算グリッドで数値計算を行ない、この地域における視程障害、吹きだまり危険度を示すハザードマップのプロトタイプを作成した（図6）。過去に取得された視程の実測データとの比較により、比較的平坦な地形上における視程変動を本モデルが精度良く再現出来ることが分かった。ただし、山岳地付近の、複雑な地形上周辺では、視程の時間変動特性についてのモデルの再現性は高いものの、視程低下量についてモデルは実測を過小評価する傾向があった。これは複雑地形上においてモデルの解像度が十分でないことに主に起因する。

本モデルは吹雪危険度ハザードマップなど広域スケールを対象とした吹雪対策のほか、防雪柵周辺における非平衡状態の吹きだまり形成過程など、小規模スケール（道路上付近など）での対策評価にも有用であり、基礎研究、実務レベルでの防災対策など幅広い活用が期待できる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

① 根本征樹、佐藤威、小杉健二、望月重人、

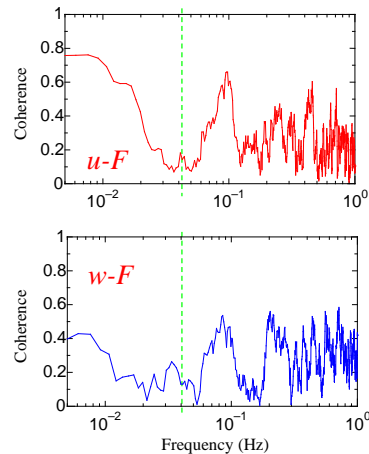


図4. 風速成分と吹雪質量フラックス間のコヒーレンス。摩擦速度 $u_* = 0.40 \text{ m/s}$ 。

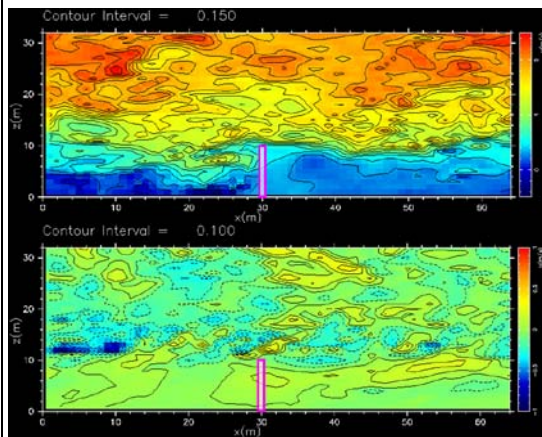


図5. 防雪柵周辺流れ場の断面図（瞬間値）。
上図：水平成分、下図：鉛直成分

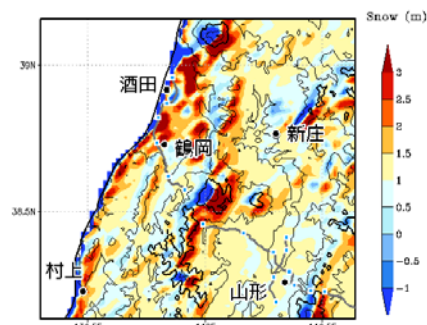


図6. 山形県周辺における積雪再配分の計算例。初期状態として全領域の積雪深を1mとして、2011/1/19 9:00から1/20 6:00まで、21時間経過後の積雪深を試算。積雪密度は 100 kg/m^3 を仮定

加藤務、鳥田宏行、西村浩一、吹雪時における飛雪流量の変動特性、寒地技術論文・報告集、査読有、27、2011、9-12.

② 根本征樹、佐藤威、小杉健二、望月重人、吹雪の乱流拡散モデルにおける落下速度の与え方について、寒地技術論文・報告集、

査読有、26、2010、49-52.

〔学会発表〕(計4件)

- ① 根本征樹、佐藤威、小杉健二、望月重人、乱流強度が吹雪の鉛直構造に及ぼす影響、日本雪氷学会全国大会、2012年9月24日、福山県立大学(広島県)
- ② 根本征樹、佐藤威、小杉健二、望月重人、加藤務、鳥田宏行、西村浩一、吹雪時における飛雪流量の変動特性、寒地技術シンポジウム、2011年11月30日、札幌コンベンションセンター(札幌市)
- ③ 根本征樹、佐藤威、西村浩一、吹雪現象へのLESの適用、日本地球惑星科学連合2011年大会、2011年5月25日、幕張メッセ国際会議場(千葉県)

- ④ 根本征樹、佐藤威、吹雪空間濃度および吹きだまり量の粒径依存性に関する数値実験、日本雪氷学会全国大会、2010年9月27日、東京エレクトロンホール宮城(仙台市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

根本 征樹 (NEMOTO MASAKI)

独立行政法人防災科学技術研究所・観測・予測研究領域 雪氷防災研究センター新庄支所・主任研究員

研究者番号：30425516